

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ПАСТБИЩНЫХ ЭКОСИСТЕМ АРИДНОЙ ЗОНЫ*

А.Н. Салугин, доктор сельскохозяйственных наук

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук,
400062, Волгоград, Университетский просп., 97
E-mail: saluginan@mail.ru

Новые подходы к изучению динамики сукцессий основаны на оригинальной концепции системной динамики, которую использовали при разработке имитационных моделей, отражающих динамику пастбищных экосистем. Временная динамика почвенно-растительного покрова естественных пастбищ Чёрных земель Калмыкии отражает деградационные процессы, которые исследуются имитационным моделированием. Процессы деградации пастбищ в субаридном поясе юга России описывали обыкновенными дифференциальными уравнениями. Эта концепция выступает базовой в разработке имитационных моделей. Динамику изменения эффективных покрытий для фитоценозов пастбищ Чёрных земель в процессе деградации прослеживали от исходных пастбищ до полного опустынивания. Аналитические решения для различных условий сукцессионной динамики при деградации естественных пастбищных угодий представляются удобным тестом при оценке адекватности имитационного моделирования. Исходные временные ряды космических наблюдений за эффективными покрытиями фитоценозов использовали для параметризации имитационных моделей. Модели реализованы в системе имитационного моделирования AnyLogic. Процесс разработки модели основан на визуальном программировании с использованием графического интерфейса пользователя. Информационные потоки в среде AnyLogic перераспределяются с течением времени по системе накопителей, связанных между собой ориентированным графом модели. Вычислительный эксперимент, демонстрирующий результаты имитации с различными параметрами, использовали для ориентировочной (качественной) оценки экосистемной устойчивости. Результаты аналитического моделирования с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений и имитационное моделирование показали высокую идентичность. Исследование динамики пастбищных экосистем с использованием вариационного эксперимента демонстрирует возможность визуального (когнитивного) подбора параметров модели, отвечающей условиям стационарности пастбищных экосистем. Изучение динамики сукцессий пастбищных фитоценозов рассматриваемым методом открывает новые возможности для решения задач оптимального использования биоресурсов и устойчивости пастбищных экосистем.

SIMULATION OF DEGRADATION OF PASTURE ECOSYSTEMS OF ARID ZONE

A.N. Salugin

Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation
of the Russian Academy of Sciences,
400062, Volgograd, Universitetskij prosp., 97
E-mail: saluginan@mail.ru

New approaches to the study of succession dynamics are based on the original concept of system dynamics, which was used in the development of simulation models reflecting the dynamics of pasture ecosystems. The temporal dynamics of the soil and vegetation cover of the natural pastures of the Black Lands of Kalmykia reflects the degradation processes that are studied by simulation modeling. The processes of pasture degradation in the subarid belt of Southern Russia were described by ordinary differential equations. This concept is the basic one in the development of simulation models. The dynamics of changes in effective coatings for phytocenoses of pastures of Black Lands in the process of degradation was traced from the original pastures to complete desertification. Analytical solutions for various conditions of succession dynamics in the degradation of natural pasture lands are a convenient test for assessing the adequacy of simulation modeling. The initial time periods of space observations of effective coatings of phytocenoses were used to parametrize simulation models. The models are implemented in the AnyLogic simulation system. The model development process is based on visual programming using the graphical user interface. Information flows in the Anylogic environment are redistributed over time through a system of storage devices interconnected by an oriented graph of the model. A computational experiment demonstrating simulation results with different parameters was used for an indicative (qualitative) assessment of ecosystem sustainability. The results of analytical modeling using ordinary differential equations and simulation modeling showed a high identity. The study of the dynamics of pasture ecosystems using a variation experiment demonstrates the possibility of visual (cognitive) selection of the parameters of the model that determines the conditions of stationarity of pasture ecosystems. Studying the dynamics of successions of pasture phytocenoses by this method opens up new opportunities for solving problems of optimal use of biological resources and sustainability of pasture ecosystems.

Ключевые слова: имитационное моделирование, системы дифференциальных уравнений, динамика сукцессий, экстремальные точки, биоразнообразие, управление биоресурсами.

Key words: simulation modeling, differential equation systems, dynamics of succession, extreme points, biodiversity, bioresource management.

Проблемы опустынивания юго-запада Европейской части России в последние годы существенно обострились в связи с изменением климата [1, 2, 3]. Чёрные Земли

Калмыкии, обладающие уникальными продуктивными естественными пастбищами, в течение многих лет подвергались антропогенному воздействию (превышение

* работа выполнена в рамках Государственного задания № 122020100450-9 «Разработка новой методологии оптимального управления биоресурсами в агроландшафтах засушливой зоны РФ с использованием системно-динамического моделирования почвенно-гидрологических процессов, комплексной оценки влияния климатических изменений и антропогенных нагрузок на агробиологический потенциал и лесорастительные условия».

пастбищной нагрузки, распашка и др.). Проблема сохранения почвенно-растительных систем (ПРС) в этой зоне решается с привлечением математического моделирования процессов их разрушения и восстановления, которые сопровождаются сукцессионными сменами фитоценозов [1, 2, 3]. В сочетании с современным технологическим и информационным прорывом системная динамика Форрестера [4] предоставляет исследователю уникальные возможности для построения имитационных моделей динамики экологических процессов. Имитационные модели деградации ПРС реализованы с применением системной динамики, которую в последние годы широко используют в разделах динамической экологии. Системная динамика помогает понять, как развивается и эволюционирует растительность в естественных условиях с учетом климатических изменений и антропогенных нагрузок. В нашем случае имитационная модель предоставляет исследователю ценную информацию о динамике пастбищных экосистем. После испытания на конкретных примерах она может оказаться адекватной наблюдениям или наоборот, выявляя «физику» процессов с построением возможных альтернатив.

В агроэкологии, наряду с наблюдением, измерением и экспериментом, математическое моделирование выступает самостоятельным методом научного исследования [5, 6, 7]. Имитационную модель можно рассматривать как метод, объединяющий математику и эксперимент. Эффективность результатов имитационного представления возрастает с увеличением доступности имитационного моделирования и развитием компьютерных технологий [7]. Для агроэкологии это особенно важно, так как часто объект ее исследования может быть недоступен из-за отсутствия данных о его строении, динамике развития или просто, если объект прекратил свое существование, например, в результате экологической катастрофы [8, 9, 10]. Преимуществом имитационного моделирования заключается в том, что исследователь может экспериментировать на виртуальном образе в виде формальной математической конструкции.

Имитационная модель отражает свойства оригинала (объекта), учитывая его структуру и взаимодействие с окружением, описывает динамику функционирования и эволюцию в пространстве и времени. Сукцессии, как пример таких процессов, в пастбищных ПРС адекватно описывают обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) на языке системной динамики [4]. Следует отметить, что объекты имитации в агроэкологии могут быть весьма различными по своей природе (биотическими и абиотическими, пространственно-протяженными и локальными, почвенными, растительными, лесными, степными и др.). Элементы агроэкосистем взаимодействуют между собой по горизонтали и вертикали различных иерархических уровней их организации. Они, как правило, выступают адекватными и изменяются во времени и пространстве. Агроэкосистемы в процессе эволюции перестраиваются, проявляя в свете общей теории систем эмерджентность и синергетическую самоорганизацию [6, 11, 12].

Цель исследования – разработать имитационную модель деградации почвенно-растительных систем на пастбищах, подверженных антропогенному влиянию и изменению климатических условий.

Методика. Возможности имитационной модели деградации ПРС с использованием имитационной среды AnyLogic 8.0 демонстрируются на примере Чёрных земель Калмыкии. Пакет имитационного моделирования фирмы XJ Technologies AnyLogic имеет удобный интерфейс с оригинальной реализацией системной динамики [4]:

в начале создаётся модель, а затем (или параллельно) настраивается презентация – наглядный показ результата ее работы в графическом режиме с динамикой во времени. Программа позволяет создавать модели и презентации, предоставляя разработчику готовые блоки в виде графических элементов, в которых скрыта вычислительная часть модели, массивов для графических построений и оптимизации. Пакет имеет ряд предварительно настраиваемых шаблонов, помогающих значительно ускорить реализацию модели. Важной особенностью выступает то обстоятельство, что алгоритмы разрабатываемой модели и вычислений реализованы на языке Java. Это позволяет избежать ошибок вычислительного характера, ускоряя отладку модели. Виртуальный алгоритм машин Java отслеживает и предотвращает сбои от подобных ошибок. Имитационные модели сукцессионных процессов в пастбищных ПРС были составлены с использованием аналитического моделирования [12].

Деградацию ПРС изучали по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в виде тренда (временного ряда) площадей пастбищных фитоценозов четырех классов опустынивания (S1 – слабосбитые злаково-прутняково-белополенные пастбища, S2 – умеренно и сильносбитые злаково-белополенные и тырсовые, S3 – сильносбитые пастбища и S4 – разбитые пески). Причины деградации, приводящие к наблюдаемым кривым тренда, обсуждены в работах [12, 13, 14], в которых выявлены различия динамики сукцессий в зависимости от схемы связей в орграфе модели, обнаружена чувствительность сукцессионных процессов к пастбищной нагрузке. Исследованная в этом контексте устойчивость ПРС и полученные результаты стимулировали использование имитационного моделирования в свете решения практических задач.

Устойчивость ПРС как способность сохранять биомассу вследствие самовосстановления (что весьма важно для решения задач оптимального природопользования) обеспечивает стационарное функционирование агроландшафтов в целом. Система ОДУ, использованная в предыдущих исследованиях [12, 14], имеет «жесткую» конструкцию, не позволяющую изменять параметры модели из-за линейности. Кроме того, в ее рамках не учитывали в явном виде влияние численности скота.

Превышение пастбищной нагрузки приводит к деградации пастбищной экосистемы, коренным образом изменяя естественное развитие фитоценозов, которые находятся в динамическом равновесии с окружающей средой (биосферой). Взаимодействия между элементами биологических систем в процессе эволюции регулируются законами биогеоценоза, обеспечивающего стационарность (устойчивость) агроэкосистем [10, 15]. Эти эколого-биологические концепции выступают базой имитационного моделирования при их изучении. Концепция системной динамики, как отмечено ранее, служит методологической основой имитационного моделирования с учетом балансовых соотношений и законов сохранения. Не менее важную роль играют экспертные знания, участвующие при формализации задачи.

Исходной информацией для составления имитационной модели служили данные ДЗЗ в виде повторных снимков, отражающих тренд ПРС [15, 16, 17]. Вычислительный эксперимент, демонстрирующий поведение ПРС на временных интервалах 10...100 лет, позволяет «разыграть» их в режиме презентации за секунды модельного компьютерного времени. Визуализация в интерактивном режиме даёт возможность когнитивно направлять компьютерный эксперимент в нужном направлении, способствуя быстрому достижению цели моделирования.

Модель, представлена оргграфом (рис. 1), на котором разрушение ПРС (стрелки вправо) сопровождается восстановлением (стрелки влево). Сохранение фитоценоза в схеме моделируется петлёй (дуга с одинаковыми индексами). Соответствующая система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\frac{dS_i}{dt} = \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} S_j, \quad j = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где S_i – площадь i -го фитоценоза, α_{ij} – коэффициенты, характеризующие интенсивности переходов между i -м и j -м фитоценозами.

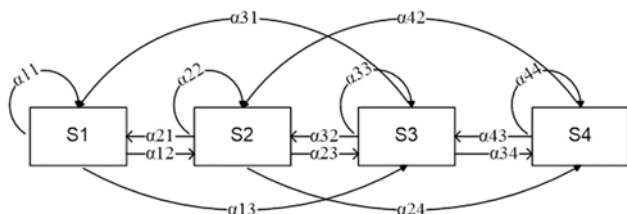


Рис. 1. Ориентированный граф сукцессионных переходов на пастбищах Черных земель Калмыкии: S_i – площади фитоценозов; α_{ij} – интенсивность сукцессий при переходе из i -го в j -е состояние ($i < j$ – разрушение $i > j$ – восстановление) [15] (индексы на дугах обозначены цифрами: $\alpha_{ij} \rightarrow a_{ij}$).

Первое уравнение системы (1) $dS_1/dt = -\alpha_{12}S_1 + \alpha_{12}S_2$ системной динамики описывает взаимодействие между первым S_1 (слабосбитые злаково-прутьяково-белополенные пастбища) и вторым S_2 (умеренно и сильносбитые злаково-белополенные и тырсовые) фитоценозами: с интенсивностью α_{12} фитоценоз S_1 «освобождает» проективное покрытие (знак у α_{12} отрицательный) фитоценозу S_2 . В свою очередь S_2 возвращает часть своего пространства фитоценозу в S_1 с интенсивностью α_{21} (знак положительный). Величины S_j измеряются в относительных единицах. Опустынивание означает, что разрушение протекает с коэффициентом деградации α_{12} , а восстановление – с коэффициентом α_{21} . Более разнообразными вариантами сукцессионных переходов обладают фитоценозы S_2 и S_3 , имеющие степень инцидентности на графе модели, равную четырём. Фитоценоз S_2 по дугам (α_{23} и α_{12}) разрушается, восстанавливаясь по дугам (α_{21} и α_{32}). Дифференциальные уравнения для S_3 (сильносбитые пастбища) и S_4 (разбитые пески) системы (1) конструируются аналогично.

Система (1) с математической точки зрения представляет собой классическую задачу Коши с начальными условиями в виде исходных площадей S_i по данным ДЗЗ. Коэффициенты α_{ij} определяли на предварительном этапе. Было установлено, что изменения площадей с разной степенью деградации во времени различны. Кривые $S_1(t)$ и $S_4(t)$ изменяются монотонно, без экстремумов: исходные пастбища экспоненциально уменьшаются, а площадь разбитых песков возрастает по логистическому закону с выходом на «плато». Для S_2 и S_3 картина иная – обе кривые с экстремумами. Площадь S_2 в начале плавно возрастает, достигая некоторого максимального значения через 20 ± 5 лет от начала деградации, а затем спадает, приближаясь к нулевой отметке к 50-му году наблюдений. Аналогично ведет себя S_3 с экстремальной точкой 30 ± 5 лет [12, 14].

Результаты и обсуждение. Имитационное моделирование в среде AnyLogic осуществляли по ранее упомянутой схеме (см. рис. 1) и уточняли в вычислитель-

ном эксперименте. В результате имитационные модели представляли собой проекты системной динамики в виде системы ОДУ (1). Переходы между состояниями фитоценозов моделировали с использованием накопителей, представляющими собой решения ОДУ (1). Накопитель, как элемент библиотеки системной динамики, содержит необходимую информацию о начальном состоянии объекта с правой частью дифференциального уравнения. Параметры ИМ указываются в окне свойств соответствующего элемента имитации. После переноса из палитры инструментов и добавления необходимых элементов системной динамики на главную панель запускается презентация. Процесс имитации демонстрирует изменение содержания накопителей в режиме модельного времени.

На схеме имитационной модели для системы (1), изображенной в виде графа (см. рис. 1), накопители S_1 , S_2 , S_3 и S_4 – площади соответствующих фитоценозов. Параметры (α_{ij}) содержат информацию об интенсивностях сукцессионных переходов и расположены внутри соответствующих связей (рис. 2а). Результаты имитационной модели, представленные в виде временного графика (рис. 2б), выступают визуальной (когнитивной) иллюстрацией процессов деградации пастбищной экосистемы, при приближении ПРС к катастрофическому состоянию, когда естественные пастбища практически уничтожены (S_1), а их место занимают разбитые пески (S_4). Подобная динамика исследована экспериментально с использованием Марковских цепей в работах [16, 17, 18]. Следует отметить, что объединение непрерывных и дискретных формализмов при моделировании сукцессионных явлений открывает новые, пока ещё не раскрытые возможности методов математического моделирования в этой области.

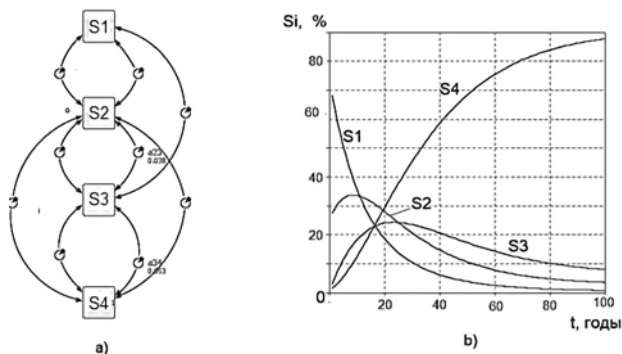


Рис. 2. Структура диаграммы (а) и результаты имитационного моделирования (б) сукцессионных переходов для пастбищной ПРС (S_i – площади фитоценозов).

Выводы. Пакет AnyLogic служит удобным инструментом, значительно ускоряющим разработку динамических моделей в динамической экологии. Программа позволяет быстро разрабатывать модели посредством объединения и настройки готовых элементов системной динамики, представляя результаты моделирования в удобном виде. AnyLogic при необходимости даёт исследователю возможность разрабатывать собственные классы объектно-ориентированного программирования.

Приведённая в работе имитационная модель выступает аналогом математической модели, на базе системы обыкновенных дифференциальных уравнений в приближении постоянных коэффициентов.

Литература

1. Логофет Д.О., Маслов А.А. Анализ мелкомасштабной динамики двух видов-доминантов в сосняке чернично-бруснично-долгомошном II. Неоднородная Марковская цепь и осредненные показатели // Журн. общ. биологии. 2018. Т. 79. № 2. С. 135–147.
2. Логофет Д.О., Уланова Н.Г. От мониторинга популяции к математической модели: новая парадигма популяционного исследования // Журн. общ. биологии. 2021. Т. 82. № 4. С. 243–269. doi: 10.31857/S0044459621040035.
3. Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А. Нейтральный баланс деградации земель – современный подход к исследованию засушливых регионов на национальном уровне // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26. № 2 (83). С. 3–9. doi: 10.1134/S2079096120020092.
4. Касталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. М.: Издательский дом «Дело», 2015. 496 с.
5. Rykh Y.A. Lyapunov-Meyer functions and distance measure from generalized Fisher's equations // IFAC-PapersOnLine. 2015. No. 48 (11). P. 115–119.
6. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомиры. СПб.: Алетей, 2002. 414 с..
7. Добровольский Г.В. Тихий кризис планеты // Вестник РАН. 1997. Т. 4. №. 67. С. 313–320.
8. Петропавловский Б.С., Варченко Л.И. Использование информационной статистики для изучения экологии растительности и динамических процессов растительного покрова земли // Сибирский экологический журнал. 2021. № 28 (3). С. 263–273. doi: 10.15372/SEJ20210301.
9. Черкашин А.К., Бибаева А.Ю. Натурные и дистанционные исследования и математическое моделирование горно степных экосистем на ландшафтной основе // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26. № 4 (85). С. 108–115. doi: 10.24411/1993-3916-2+020-10125.
10. Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломещ А.И. Современная наука о растительности: учебник. М.: Логос, 2002. 264 с.
11. Vlasenko M.V., Kulik A.K., Salugin A.N. Evaluation of the ecological status and loss of productivity of arid pasture ecosystems of the Sarpa lowland // Arid Ecosystems. 2019. No. 9 (4). P. 273–281. doi: 10.1134/S2079096119040097.
12. Салугин А.Н., Власенко М.В. Аналитическое моделирование деградации аридных пастбищ // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3 (63). С. 366–376. doi: 10.32786/2071-9485-2021-03-38.
13. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
14. Салугин А.Н. Численное моделирование сукцессионных переходов в агроэкологии // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 1. С. 62–65. doi: 10.31857/S2500-2627-2020-1-62-65.
15. Salugin A.N., Vlasenko M.V. Mathematical models of the dynamic stability of arid pasture ecosystems in the south of Russia // Agronomy. 2022. No. 12 (6). P. 1448. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/6/> (дата обращения: 10.03.2023). doi: 10.3390/agronomy12061448.
16. Гусев А.П. Закономерности долговременной динамики локальных геосистем юго-востока Беларуси // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2022. Т. 8 (74). № 2. С. 60–70.
17. Обратный прогноз подтверждает вывод о жизнеспособности ценопопуляции растений / Д.О. Логофет, Е.С. Казанцева, И.Н. Белова и др. // Журн. общ. биологии. 2020. Т. 81. № 4. С. 257–271. doi: 10.31857/S0044459620040041.
18. Маслов А.А., Логофет Д.О. Совместная динамика популяций черники и брусники в заповедном послепожарном сосняке-зеленомошнике. Модель с осредненными вероятностями перехода // Журн. общ. биологии. 2020. Т. 81. № 4. С. 243–256. doi: 10.31857

Поступила в редакцию 17.01.2023

После доработки 09.02.2023

Принята к публикации 01.03.2023